DOI:10.11931/guihaia.gxzw201802011

芦苇腐解土中酚酸类化感物质的水分响应特性研究

孙盈[1]，李萍萍[2]，付为国[1,2*]

(1. 江苏大学农业工程研究院，江苏 镇江 212013；2．南京林业大学南方现代林业协同创新中心，南京 210037)

摘要：芦苇和虉草均具有较强的去污能力，常作为湿地植物配置于同一人工湿地进行污水处理。芦苇作为一种强化感植物对虉草具有较强的化感作用，在自然湿地和人工湿地中均会出现芦苇代替虉草的现象，且这一现象的发生与土壤含水量存在一定联系，此外，有研究表明芦苇腐解土对虉草的化感抑制效应与腐解土中总酚酸的量密切相关。因此，该文采用高效液相色谱法对不同水分环境下芦苇腐解土中酚酸类物质进行分离和鉴定，研究芦苇腐解土中主要酚酸类物质的水分响应特性，筛选出其中对水分响应较为明显的酚酸物质种类，通过湿地土壤水分调控，以达成虉草芦苇间的竞争平衡，从而维持人工湿地中两物种的长期稳定共存。结果显示:芦苇腐解土中可分离出没食子酸、香豆酸、香草酸、丁香酸、对香豆酸、阿魏酸、水杨酸和苯甲酸等 8 种酚酸类物质，其中，香豆酸、苯甲酸和阿魏酸等 3 种酚酸类物质含量较高。分离出的 8 种酚酸类物质的含量与腐解土的相对含水量均呈显著线性负相关关系，即随着腐解土相对含水量的上升，酚酸类物质的含量均呈现下降趋势，且各种酚酸类物质对水分的响应趋势均可用线性方程较好地拟合。其中，香豆酸、没食子酸和阿魏酸对芦苇腐解土的水分响应最为明显。因此，可将香豆酸、没食子酸和阿魏酸作为主要调控目标，通过调控湿地土壤中水分含量，削弱芦苇对虉草的化感抑制效应，从而维持虉草芦苇群落的稳定。

关键词：芦苇，酚酸，腐解，化感作用，水分响应

Characteristics of response of phenolic acids substances in *Phragmites australis* decomposing soil to soil moisture

SUN Yin[1]，LI Ping-ping[2]，FU Wei-guo[1,2*]

（[1] *Agricultural Engineering Research Institute, Jiangsu University*，*Jiangsu Zhenjiang 212013* ；[2] *Cooperative Innovation Center of Southern Modern Forestry*，*Nanjing Forestry University*，*Jiangsu Nanjing 210037*）

Abstract: Both *Phragmites australis* and *Phalaris arundinacea* have strong detergency capabilities and are often deployed as wetland plants in the same constructed wetland for sewage treatment. As a kind of allelopathic plant, *P.*

基金项目：江苏省高校自然科学研究重大项目（15KJA210001）；国家自然科学基金项目(31370448);
[Supported by Major Project of Natural Science Research of Colleges and Universities in Jiangsu Province (15KJA210001); National Nature Science Foundation of China (31370448)]。
第一作者：孙盈（1991-），女，江苏泰州人，硕士研究生，主要从事湿地化感植物研究，（E-mail）:690199286@qq.com。
*通信作者：付为国，博士，研究员，从事的研究方向：种群生态学，（E-mail）fuweiguo@ujs.edu.cn。

australis has strong allelopathy effect on *P. arundinacea* and *P.* arundinacea would be instead of P. australis in both natural wetland and constructed wetland. Studies have shown that this phenomenon is related to the soil moisture content and the allelopathic inhibitory effect of *P. australis* decomposing soil on *P. arundinace*a is closely related to the amount of total phenolic acids in the decomposing soil. Therefore, high performance liquid chromatography (HPLC) was used to separate and identify phenolic acids substances in *P. australis* decomposing soil under different moisture content conditions to select the types of phenolic acids that most obvious responded to moisture in this paper. The competition balance between *P. australis* and *P. arundinacea* can be achieved through the regulation of wetland soil moisture, therefore, the long-term stable coexistence of the two species in the constructed wetland can be achieved. The results showed that 8 kinds of phenolic acids were separated and identified, which are gallic acid, coumaric acid, vanillic acid, syringic acid, p-coumaric acid, ferulic acid, salicylic acid, and benzoic acid. The contents of three kinds of phenolic acids of coumaric acid, benzoic acid, and ferulic acid were higher among 8 kinds of identified phenolic acids. There was a significant linear negative correlation between content of every identified phenolic acid and the relative moisture content of the *P. australis* decomposing soil. Which is, as an increase in the relative moisture content of *P. australis* decomposing soil, content of every identified phenolic acid showed a downward trend, and the response curve of content of every identified phenolic acid to the relative moisture content of *P. australis* decomposing soil can be fitted well with a linear equation. Responses of coumarinic acid, gallic acid, and ferulic acid to soil moisture were most obvious among 8 kinds of identified phenolic acids. Therefore, coumanic acid, gallic acid, and ferulic acid can be used as the main regulatory targets, the allelopathic inhibitory effect of *P. australis* on *P. arundinacea* can be weakened by regulating the moisture content of wetland soil so as to maintain the stability of *P. australis* and *P. arundinacea* community.

Key words: *Phragmites australis*, phenolic acids, decomposition, allelopathy, response to moisture

芦苇（*Phragmites australis*）是一种多年生根茎类禾本科植物，无性繁殖能力强，天然种群多以根茎繁殖补充更新为主，常在栖息地形成单优群落，广泛分布于江、河、湖、海岸及淤滩等（庄瑶等，2010）。国内外的相关研究证实芦苇是一种强化感植物，对藻类如蓝藻（Nakai S，2006）及一些高等植物甚至是一些入侵植物如互花米草（郑琨，2009）、一枝黄花（刘成，2014）均具有较强的化感抑制作用（付为国等，2013）。

尽管芦苇对虉草具有很强的化感抑制作用，但是在芦苇-虉草自然湿地和人工湿地中，芦苇种群代替虉草种群这一现象均随着湿地基底淤积抬高而逐渐发生（Březinová T，2014）（Wei-Guo Fu，2013），鉴于芦苇是一种强化感植物以及化感作用具有强烈的“随着土壤水分降低，化感抑制效应增加”水环境响应特性（王春晴等，2011），我们有理由推断：芦苇

种群对藨草种群的逐步替代过程正是芦苇对藨草化感抑制效应随基底抬升土壤含水量降低而逐渐增强的过程。事实上化感物质的释放途径包括雨雾淋溶、植物挥发、植株残体降解和根系分泌等（林娟等，2007），但只有进入土壤中的根系分泌物和植株残体化学物质与土壤水分含量相关性较高。其中，尹淇淋（2015）曾研究了芦苇根系分泌物对藨草的化感抑制效应及其水环境响应特性，并用高效液相色谱法（HPLC）鉴定和分离出根系及根际土壤中含有香豆酸、香草酸、没食子酸、苯甲酸、丁香酸、阿魏酸和水杨酸等 7 种酚酸物质；日本学者 Nakai S 从芦苇腐解液中分离出了香豆酸、阿魏酸、没食子酸和香草酸等酚酸类化感物质。关于化感物质的另一主要来源的植物残体和枯落物，有研究曾利用磷钼酸-磷钨酸盐比色法测试和分析了芦苇枯落腐解物中总酚酸的含量及其对藨草的化感抑制效应（付为国等，2015），但并未对枯落腐解物中所含的酚酸类物质进一步鉴定、分离和测定，更未对其水分响应特性进行研究。因此，本研究将利用 HPLC 法，通过芦苇枯落物腐解土的制备，对不同水分条件下芦苇枯落物腐解土中各酚酸类物质进行鉴定、分离和测定，将其中对水分响应较为明显的酚酸类物质作为主要调控目标，通过调控湿地土壤中水分含量，维持藨草芦苇种群长期竞争共存，从而为藨草芦苇人工湿地的群落稳定管理提供理论支持和技术指导。

1 材料与方法

1 研究区域概括和实验材料与方法

1.1 研究区域概括

长江下游镇江滨江湿地（32 º 15 ’ N，119 º 28 ' E）气候属暖温带向北亚热带过渡的季风带气候，受季风影响，四季分明，气候温暖湿润，年平均气温为 15.4 ℃，年降水量为 1074.0 mm，年蒸发量为 847～1 755.9 mm。该湿地是由江水携带的泥沙长年淤积而成，水文状况复杂，既有感潮河段的日变化，又有丰水期、平水期和枯水期的季节变化。湿地植物生长茂盛，植被发育于江滩裸地的原生演替，随着湿地基底抬升，芦苇群落逐渐替代藨草群落成为湿地的顶级群落。

1. 2 实验材料与实验设计

芦苇枯落物收集和处理：2016 年 11 月初，于镇江滨江湿地收集枯死的芦苇植株，晒干后粉碎成末。同期自滨江湿地光滩采取一定量新淤积的泥土，晒干、磨碎、去杂、过筛。然后将泥土和芦苇粉末按 3:1 的体积比混合均匀（比例参考滨江湿地土壤与芦苇残体单位面积比），再将等体积混合后的土样置于 12 个塑料桶（规格：上径 24 cm、下径 26 cm、高 22 cm）

内腐解。腐解期间设置 4 个水分处理：T_1、T_2、T_3 和 T_4(表 1)，每个处理 3 次重复, 即每个塑料桶为 1 个处理的一次重复。腐解期间利用称重法维持各处理的土壤含水量在设置的范围内。2017 年 11 月 1 日，分别进行各处理腐解土中酚酸类物质的分离、鉴定和测定，后取其均值分析。

表 1 各处理土壤相对含水量

Table1 Relative moisture contents of soil in the different treatments

处理 Treatment	相对含水量（%）Relative moisture content
T_1	65～70
T_2	75～80
T_3	85～90
T_4	95～100

1.3 芦苇腐解土中酚酸类物质的 HPLC 分析

1.3.1 仪器与试剂

Thermo UltiMate 3000 型高效液相色谱仪(四元泵，UV 检测器，Chromeleon 7 色谱工作站，Thermo Fisher 公司)；R-201 旋转蒸发仪（上海亚荣生化仪器厂）；SHZ-D(III)（真空泵河南予华仪器有限公司）；KH-100 超声波清洗器（昆山禾创超声仪器公司）；Neofugo 18R 高速离心机（力康生物医疗科技）；CHA-S 气浴恒温振荡器（金坛荣华仪器制造有限公司)；BSA224S 电子分析天平（万分之一，德国 Sartorius）。标准品没食子酸、阿魏酸、苯甲酸、香草酸、香豆酸、丁香酸、对香豆酸、对羟基苯甲酸、水杨酸、咖啡酸、芥子酸、绿原酸，购自上海晨易生物公司。

1.3.2 色谱条件

色谱柱为 Thermo Accucore XL C18（250 mm×4.6 mm，4 um）；流动相 A 为甲醇色谱纯；流动相 B 为 1%乙酸水溶液；UV 检测波长为 280 nm；柱温为 30 ℃；梯度洗脱条件：0～8 min，甲醇 5%～40%；8～19 min，甲醇 40%～35%；19～30 min，甲醇 10 %；流速为 1 ml/min。

1.3.3 标准溶液的配制

准确称取上述 10 种酚酸标准品各 10 mg，置于 10 mL 容量瓶中，加 50%甲醇水溶液溶解并定容，得 1 $mg{\cdot}mL^{-1}$ 的 10 种酚酸溶液混合液，依次用 50%甲醇水溶液稀释 2、10、50、100 倍配制成系列标准样品混合溶液。同时准确称取 10 种酚酸标准品各 1mg，分别置于 10 mL 容量瓶中，加 50%甲醇水溶液溶解并定容，得 1 $mg{\cdot}mL^{-1}$ 的单一种酚酸溶液，用于液相

色谱单峰的鉴别与定性。

1.3.4 芦苇腐解土样品溶液的制备

取芦苇腐解土 10 g，置锥形瓶中，加入 50 %甲醇水溶液 100 mL 常温下震荡提取 6 小时，后上离心机分离取上清液，再用旋转蒸发仪（真空，30 ℃）浓缩成 1 mL 样品溶液，过 0.22 um 有机过滤膜。

1.4 统计分析

对芦苇腐解土中酚酸物质含量与土壤相对含水量的响应关系进行线性回归分析。运用 excel 2007 及 SPSS11.5 统计软件进行数据处理和显著性分析。

2. 结果与分析

2.1 色谱分析条件的选择

2.11 检测波长的选择

对 10 种酚酸类物质标准样品进行最大吸收光谱扫描，扫描波长范围为 190～400 nm。分析不同酚酸类物质的最大吸收光谱，10 种酚酸类物质在 280 nm 左右均有较大吸收峰，因此，试验选取 280 nm 作为酚酸类物质的定量检测波长。

2.12 流动相的选择和优化

由于酚酸类物质中的酚羟基与羧基在水溶液中较易发生电离，使其水溶液极性有所增强，在固定相上会发生双重保留，造成色谱峰拖尾严重，加入适量的酸性调节剂，可在一定程度上抑制多酚的电离，使极性减弱，增强其在固定相上的保留，使分离效果和峰形得到改善（刘江云等，2002）。实验采用乙酸作为流动相的酸性调节剂，其浓度对酚酸类物质的出峰时间和峰型均有一定影响。分别考察了 0.5%～2% 不同浓度乙酸水溶液对 10 种酚酸类物质的分离效果，最终选择了 1%乙酸水溶液。在采用等度流动相洗脱时，各峰的分离效果不够理想，采用梯度洗脱后各峰分离较好，经过多次梯度洗脱条件优化筛选，最理想洗脱条件为：0～8 min，甲醇 5%～40%；8～19 min，甲醇 40%～35%；19～30 min，甲醇 10%；流速为 1 $ml \cdot min^{-1}$。在此梯度条件下，10 种酚酸类物质均能得到较好的分离，色谱峰峰形良好、保留时间稳定。

2.2 芦苇腐解土中酚酸类物质种类的鉴定

分别将适量的单一酚酸标准溶液加入混合酚酸标准品中进行分析，通过与未加入单一酚酸标准溶液的混合酚酸标准品色谱图进行对比，将峰面积明显增大的峰认定为该酚酸的色谱峰，以此方法逐一确认 10 种酚酸的相应位置和出峰时间。根据出峰时间将芦苇腐解土样品

溶液色谱图与混合标准品色谱图进行对比，确定芦苇腐解土样品溶液中含有没食子酸、香豆酸、香草酸、丁香酸、对香豆酸、阿魏酸、水杨酸和苯甲酸等 8 种酚酸类化合物。酚酸混合标准品色谱图和芦苇腐解土样品溶液色谱图见图 1。

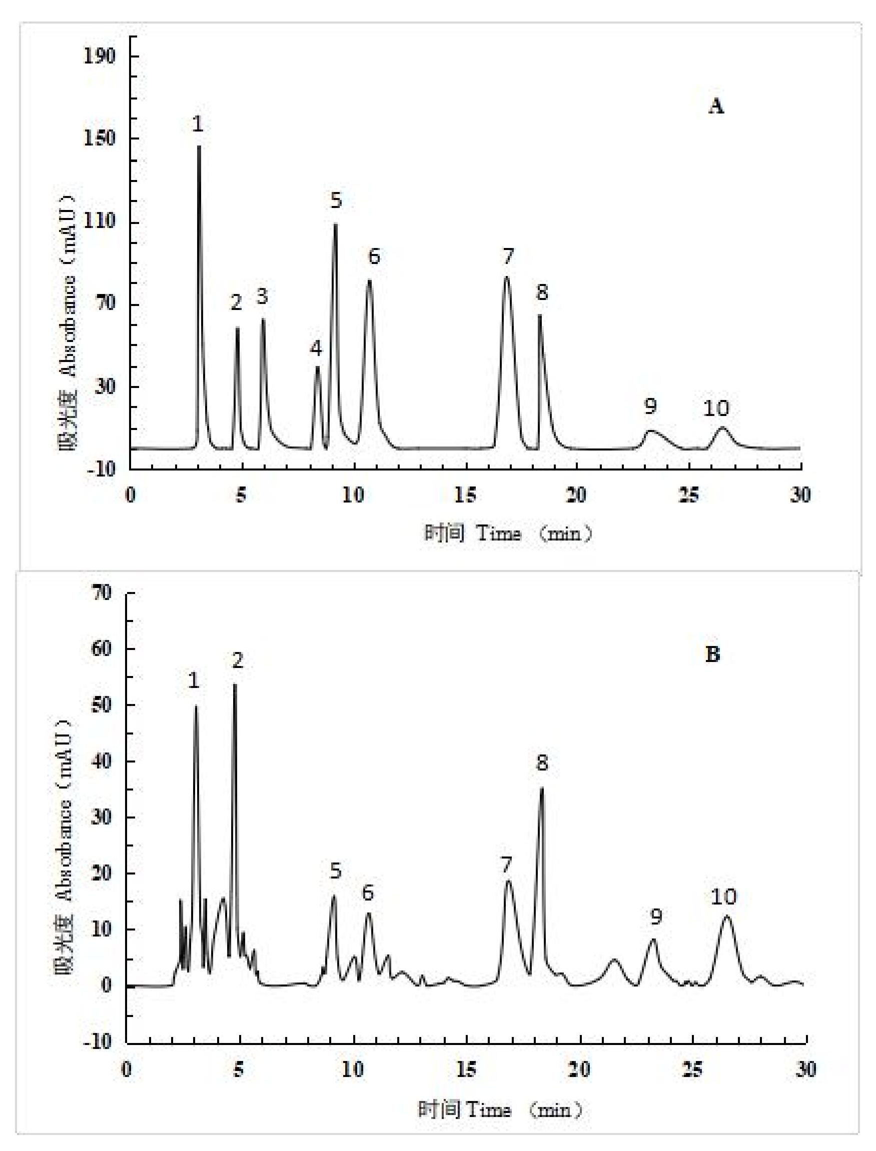


图 1　A.十种酚酸混合标准品色谱图；B.芦苇腐解土样品溶液色谱图

Fig. 1　A.HPLC chromatogram of a mixture of 10 phenolic acid standards;

B.HPLC chromatogram of *P. australis* decomposing soil

2.2 芦苇腐解土中酚酸类物质水分响应关系

将已逐级稀释配制的 10 种酚酸混合液分别进样 10μL，以各种酚酸浓度 x（μg/mL）为横坐标，其峰面积值 S（mAU）为纵坐标绘制标准曲线，计算得到 10 种酚酸物质的线性回归方程、相关系数及线性范围，以仪器信噪比（S/N≥3）确定 10 种酚酸物质的最低检出限（表 2）。10 种酚酸物质的线性回归方程的判定系数均达到 0. 999 以上，在 $P<0.01$ 水平极

显著相关，因此适用于对芦苇腐解土中酚酸类物质的 HPLC 定量计算分析。

表 2 十种酚酸物质的线性关系

Table2 The linear relationships of ten phenolic acids

酚酸种类 Phenolic acids	线性范围 Linear range/mg・mL^{-1}	回归方程 Regression equation	判定系数 R^2 Coefficient of determinat	检出限 Detection limit/mg・L^{-1}
没食子酸（Gallic acid）	0.01~1.00	S = 383.27*x* - 1.9679	0.9995**	0.034
香豆酸（Coumalic acid）	0.01~1.00	S = 133.95*x* - 1.02	0.9993**	0.056
咖啡酸（Caffeic acid）	0.01~1.00	S = 411.83*x* + 0.1197	0.9997**	0.027
对羟基苯甲酸（ P-hydroxybenzoic acid）	0.01~1.00	S = 174.17*x* + 1.2413	0.9997**	0.024
丁香酸（Syringic acid）	0.01~1.00	S = 262.26*x* + 1.0467	0.9993**	0.045
香草酸（Vanillic acid）	0.01~1.00	S = 206.82*x* + 1.488	0.9995**	0.023
对香豆酸（P-coumalic acid）	0.01~1.00	S = 663.37*x* + 9.1897	0.9995**	0.035
阿魏酸（Ferulic acid）	0.01~1.00	S = 399.56*x* + 2.3682	0.9993**	0.058
水杨酸（Salicylic acid）	0.01~1.00	S = 66.787*x* - 0.2911	0.9998**	0.020
苯甲酸（Benzoic acid）	0.01~1.00	S = 71.167*x* - 0.2725	0.9997**	0.031

注：**表示在 P <0.01 水平下极显著相关

Note：**represent the relevance significant at the 0.01 level

根据以上各标准曲线的线性回归方程，计算出不同处理下芦苇腐解土样品溶液中各酚酸类物质的含量。进而将各酚酸类物质含量与其对应芦苇腐解土的相对含水量进行线性回归拟合，得出各拟合方程和拟合图（图 2）。由判定系数可知，利用线性方程 Y=a*x*+b 拟合各酚酸类物质对土壤水分的响应，拟合效果很好。显著性分析显示，被鉴定出的 8 种酚酸类物质含量与其环境中腐解土相对含水量均呈极显著的负相关关系（P <0.01）。由各酚酸类物质对水分拟合方程的斜率判定，香豆酸对腐解土相对含水量的响应最为明显，其次为没食子酸和阿魏酸，然后依次是香草酸、对香豆酸、水杨酸和苯甲酸，而响应关系最弱的是丁香酸。

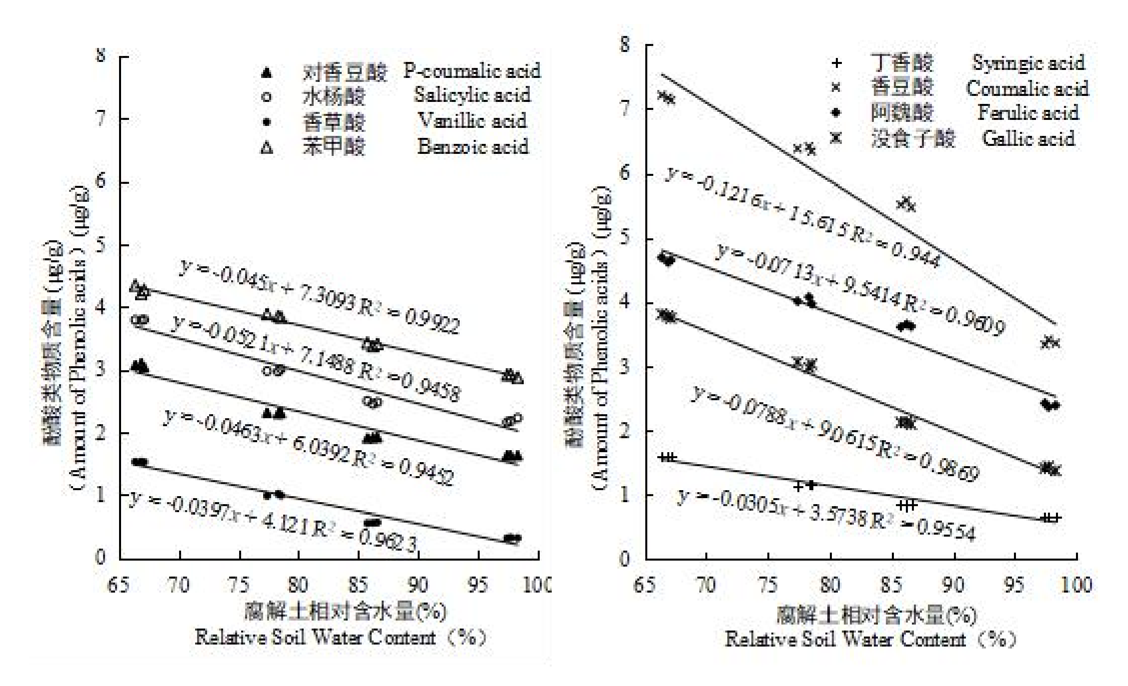


图 2 芦苇腐解土中酚酸物质含量对土壤相对含水量响应的线性拟合

Fig2. Linear fitting of responses of Phenolic acids to relative moisture content in the *P. australis* decomposing soil

3. 结论与讨论

土壤中微生物可以利用酚酸作为碳源和能量，在限制性条件下酚酸可为固氮菌提供碳源是酚酸化感活性能否表现的决定因素，也就是说微生物既能降低也可以放大酚酸的毒性，而土壤水分是土壤中可溶性有机质有效性和可移动性的主要控制因子（Casals P，2000），可溶性有机质是土壤微生物主要的呼吸底物和能量来源（陈全胜 2003），因此土壤水分状况的变化会对土壤的微生物呼吸产生深刻影响，从而影响酚酸物质的化感活性。与此同时，土壤水分增加使得土壤透气性下降 O_2 含量减少，也在一定程度上影响土壤中的硝化作用与固氮作用，而土壤微生物的固氮作用在一定程度上决定酚酸物质的转化与化感活性（Kefeli，2003）。因此，芦苇腐解土中酚酸类化感物质的水分响应可能是通过土壤透气性、土壤中氮循环及微生物活动等多种因子综合作用实现的。

植物枯落残体可通过腐解向土壤中释放对自身或其他植物具有明显化感作用的酚酸类物质。吴立洁等（2014）从三七根际土壤中检测到对羟基苯甲酸、香草酸、丁香酸、对香豆酸、阿魏酸、苯甲酸 6 种酚酸类物质，并证实酚酸在三七根际土壤中的含量已达到显著抑制三七生长的含量；李坤等（2011）等发现葡萄根系腐解物中的苯甲酸、苯丙酸和水杨酸对山河二号葡萄（*V. amurensis*×*V. riparia*）组培苗具有显著的化感抑制作用。本研究以 10 种较为普遍的具有化感效应的酚酸类物质为标样，采用 HPLC 技术在芦苇腐解土中鉴定出没食子酸、香豆酸、香草酸、丁香酸、对香豆酸、阿魏酸、水杨酸和苯甲酸等 8 种酚酸类物质。

检出酚酸物质种类与尹淇淋（2015）从芦苇根系中分离的酚酸物质相比多检出对香豆酸，比Nakai S（2006）从芦苇腐解液中分离的酚酸类物质多检出丁香酸、对香豆酸、水杨酸和苯甲酸，即芦苇枯落残体腐解土与芦苇根系和芦苇腐解液的酚酸物质种类不尽相同，这可能是由于土壤微生物在一定程度上影响了酚酸物质的化感活性。芦苇腐解土中 8 种酚酸类物质的含量与其土壤相对含水量均呈现显著线性负相关关系，即随着芦苇腐解土相对含水量的上升，酚酸类物质均呈现下降趋势，且不同酚酸类物质的含量与腐解土相对含水量的关系可用线性方程加以拟合。不同种类酚酸物质对腐解土中的水分响应强度存在较大差异，其中，香豆酸的含量对腐解土中的水分响应最为明显，其次为没食子酸和阿魏酸。

通过研究芦苇腐解土中酚酸类物质的含量对水分响应关系，得出众多的酚酸类物质中香豆酸、没食子酸和阿魏酸 3 种酚酸类物质对土壤水分具有较强的响应特性，即随着土壤含水量的上升，它们的含量降幅更加明显。因此，在虉草-芦苇人工湿地植物群落稳定性维护过程中，可将香豆酸、没食子酸和阿魏酸 3 种酚酸类物质作为主要调控目标，通过调控湿地土壤中水分含量，削弱芦苇对虉草的化感抑制效应，从而维持虉草-芦苇群落的稳定。事实上，这一结论是基于不同酚酸类物质的含量对土壤水分响应所得到的。然而，在众多的酚酸物质中，或许存在某种物质，尽管土壤水分的增加使其在含量上仅出现较小的降低，即其含量对水分响应较弱，但其化感抑制效应或许出现明显的减弱，这一该类化感物质同样可作为主要调控目标，因此，这就需要针对不同酚酸类物进行化感抑制的剂量效应研究，从而更为精确全面地筛选出合理的调控目标，通过湿地土壤水分调控，以达成虉草芦苇间的竞争平衡，从而维持人工湿地中两物种的长期稳定共存。

参考文献：

Casals P, Romanyà J, Cortina J, et al. CO_2, efflux from a Mediterranean semi-arid forest soil. I. Seasonality and effects of stoniness[J]. Biogeochemistry, 2000, 48(3):261-281.

CHEN QSH， LI LH， HAN XG， et al， 2003． Effects of water content on soil respiration and the mechanisms[J]．Acta Ecol Sin，23（5）：972-978．[陈全胜，李凌浩，韩兴国，等，2003．水分对土壤呼吸的影响及机理[J]．生态学报，23（5）：972-978．]

Fu WG, Wang FK, Yin QL, et al, 2015. Niche dynamics of species in succession process in the Wetland of Yangtze Rivers Lower Reach[J]. Plant Ecol Evol, 148(1):43-51.

FU WG，TIAN YF，TANG JJ，et al，2013．Allelopathtic effects of *Phragmites communis* aqueous extract on seed germination and seedling growth of *Phalaris arundinacea*[J]．Guihaia，33（2）：154-158．[付为国，田远飞，汤涓涓，等，2010 芦苇浸提液对虉草种子萌发及幼苗生长生理特性的影响[J]．广西植物，2013，

33（2）：154-158．]

FU WG，YING QL，LI PP，et al，2015．The effect of allelopathic effect of decompose *Phragmites* from Zhenjiang riverside wetland to the Growth Index of *Phalaris arundinacea*．[J]．Wetland Sci，13（1）：118-123．[付为国，尹淇淋，李萍萍，等，2015 镇江滨江湿地芦苇腐解物化感作用对虉草生长指标的影响[J]． 湿地科学，2015，13（1）：118-123．]

Kefeli V I, Kalevitch M V, Borsari B, et al, 2003. Phenolic cycle in plants and environment[J]. J Mol Cell Biol, (2):13-18.

LIU JY，YANG XD，X LZ， et al， 2002． Studies on the separation and determination of natural phenolic acids by reversed-phase high performance liquid chromatography[J]. Chin J of Chrom， 2002，20（3）：245-248[刘江云，杨学东，徐丽珍，等，2002 天然酚酸类化合物的反相高效液相色谱分析[J]．色谱，20（3）：245-248．]

LIU CH， CHEN XD， et al， 2014． The effect of reed-leaf blade effect on the growth and physiological and biochemical characteristics of solidago canadensis L[J]．Acta Agrestia Sin，23（3）：182-190．[刘成，陈晓德，吴明，等，2014 芦苇叶片化感作用对加拿大一枝黄花生长及生理生化特性的影响[J]．草业学报，23（3）：182-190．]

LIN J，YIN QY，YANG BZH，et al，2007．Review of allelopathy of plants[J]．Chin Agri Sci Bull，23（1）：68-72．[林娟，殷全玉，杨丙，等，2007．植物化感作用研究进展[J]．中国农学通报，2007，23（1）：68-72．]

LI K，GUO XW，GUO YS，et al，2014．Allelopathy of grape root decomposition and isolation and identification of phenolic acids[J]．J Fruit Sci，28（5）：776-781．[李坤，郭修武，郭印山，等，2014，葡萄根系腐解物的化感效应及酚酸类化感物质的分离鉴定[J]．果树学报，28（5）：776-781．]

S． Nakai, Zhou S, Hosomi M, et al, 2006. Allelopathic growth inhibition of cyano bacteria by reed[J]. Allelopathy J, 18(2):277-285.

T. Br ezinova, Vymazal J, et al, 2014. Competition of *Phragmites australis* and *Phalaris arundinacea* in constructed wetlands with horizontal subsurface flow – does it affect BOD 5, COD and TS[J]. Ecol Eng, 73(73):53-57.

WANG CHQ，LIU Q，LI L，et al，2011．Review of studies on allelopathy in plants[J]．J of Anhui Agri Sci，39（21）：12633-12636．[王春晴，刘强，李蕾，等，2011．植物化感作用研究动态[J]．安徽农业科学，39（21）：12633-126316．]

WU LJ，2014．Study on allelopathy of phenolic acids in rhizosphere soil of panax notoginseng and its intervention

measures[D]．Beijing：BUCM．[吴立洁，2014．三七根际土壤中酚酸类物质化感作用及其干预措施研究[D]．北京：北京中医药大学．]

YING QL，2015． Allelopathy of *Phragmites australis* and its response to water environment[D]． Zhenjiang：Jiangsu University．[尹淇淋，2015．芦苇对藕草的化感抑制效应及其水环境响应特性研究[D]．镇江：江苏大学．]

ZHUANG Y，SUN YX，WANG ZS，et al，2010．Research advances in ecotypes of *Phragmites australis*[J]．Acta Ecol Sin，30（8）：2173-2181．[庄瑶，孙一香，王中生，等，2010 芦苇生态型研究进展[J]．生态学报，30（8）：2173-2181．]